



允许越浪斜坡式防波堤顶高程优化研究

张雄辉, 杜冰茹, 付涛, 李珊珊
(交通运输部广州打捞局, 广东 广州 510610)

摘要: 基于南海应急抢险打捞保障基地工程对允许越浪斜坡式防波堤顶高程进行优化, 在保证不恶化港内泊稳条件、码头结构和防波堤结构安全的前提下, 最大限度降低堤顶高程以达到降低工程投资的目的。通过波浪断面物理模型试验模拟堤后次生波并与波浪数学模型推算的绕射波进行叠加, 计算不同堤顶高程对应码头结构所受的波浪力, 并通过有限元软件分析码头结构的安全性, 同时通过波浪断面物理模型试验验证防波堤结构的稳定性。结果表明: 对于码头和防波堤采用分离式布置的工程, 防波堤防护要求可适当降低。堤顶高程按设计高水位+2 a 一遇 $H_{13\%}$ 基本不越浪控制, 防波堤和码头结构安全可靠。

关键词: 断面物理模型; 次生波; 堤顶高程; 允许越浪

中图分类号: U656.2+1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0061-07

Optimization of crest elevation of sloping breakwater allowing wave overtopping

ZHANG Xionghui, DU Bingru, FU Tao, LI Shanshan

(Guangzhou Salvage Bureau of the Ministry of Transport, Guangzhou 510610, China)

Abstract: Based on the South China Sea emergency salvage and support base project, we optimize the crest elevation of the sloping breakwater allowing wave overtopping to minimize investment while upholding the stability of harbor mooring conditions, wharf structure, and structural safety of breakwater. By conducting wave section physical model tests, we simulate secondary waves behind the breakwater and overlaid with diffracted waves calculated by mathematical models. Then we calculate wave forces on wharf structure for varying crest elevations, carry out the structural safety analysis of wharf by finite element software, and verify the stability of the breakwater structure by wave section physical model tests. The results indicate that for projects with separate dock and breakwater layouts, breakwater protection requirements can be suitably reduced. Ensuring the crest elevation does not exceed the design high water level + $H_{13\%}$ of once every two years effectively maintains the safety and reliability of breakwater and wharf structures.

Keywords: section physical model; secondary wave; crest elevation; wave overtopping allowance

在水深超过 10 m 的强浪海域建港, 防波堤工程占主要工程投资。对于斜坡式防波堤, 在地基条件及断面结构形式确定的前提下, 堤顶高程是影响防波堤工程造价的主要因素之一。降低防波

堤顶高程, 可有效减少工程量, 从而降低工程投资。对于允许越浪斜坡堤顶高程的设计标准和依据, 参考 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[1](简称“规范”)第 4.2.2 节, 对允许越浪、顶

收稿日期: 2024-02-07

作者简介: 张雄辉 (1975—), 男, 高级工程师, 从事港口航道工程研究。

部无胸墙的斜坡堤,堤顶高程宜在设计高水位以上不小于0.6倍设计波高值(50 a一遇 $H_{13\%}$)。对于防护较高的斜坡堤,应按波浪爬高计算确定其堤顶高程,并需要控制越浪量。由于不同工程的实际情况不同,可采取不同的优化措施。戈龙仔等^[2]按允许越浪量不大于 $0.05 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$ 控制,应用断面物理模型验证不同斜坡式护岸堤顶高程、L形挡浪墙、反弧形挡浪墙、不同斜坡坡度及肩台宽度等措施下结构稳定性及越浪量是否满足要求;邓凌等^[3]通过越浪量控制优化公务码头防波堤顶高程,并采用断面物理模型验证挡浪墙和护面块体稳定性;李春潮等^[4]在允许越浪的堤顶高程范围内,建立断面物理模型验证护面块体的稳定性,并测量堤后次生波,优化堤顶高程并考虑施工工艺的影响;周惊慧等^[5]通过采用斜向浪折减、波浪爬高计算堤顶高程,并通过整体物理模型对不同堤顶高程方案进行验证,结果表明,在2 a一遇的波浪作用下,随着防波堤高程的降低,港区内波高变幅很小;王军等^[6]研究消浪肩台对斜坡式防波堤顶高程的影响,结果表明,设有消浪肩台的斜坡堤可显著降低堤顶越浪量,设有消浪肩台的斜坡堤可显著降低顶高程;王君辉等^[7]在岛式防波堤设计中,采用欧洲标准计算越浪量和堤后次声波,确定堤顶高程,并通过整体物理模型对岛式防波堤越浪量进行验证;杨云兰等^[8]根据深水岛式斜坡式防波堤工程实际,借助断面物理模型,对防波堤与原油码头的距离、防波堤长度、高程进行了优化,将堤顶高程从规范规定的设计高水位+0.6倍设计波高,优化至设计高水位+0.22倍设计波高,大幅节省了工程费用。

本文在总结以往研究的基础上,结合本工程实际,提出基于码头和防波堤分离式布置的堤顶高程优化思路,采用断面物理模型试验,对不同堤顶高程的防波堤稳定性进行验证,测量堤后次生波叠加绕射波。利用有限元软件分析码头结构安全,同时考虑施工工艺采用陆域推填方式的影

响。研究成果可为强浪海域其他类似工程的防波堤设计提供参考。

1 工程概况

拟建南海应急抢险打捞保障基地位于海南岛东侧沿海海域,建设1个8万吨级重件泊位。工程海域海况恶劣,50 a一遇波高可达10 m以上,必须设置防波堤为泊位提供掩护。防波堤东南-南向布置,东防波堤长458 m,南防波堤长242 m,南防波堤水深约11 m。防波堤内外侧均为斜坡式结构,内外坡均采用1:1.5坡度,采用抛石斜坡堤结构。根据防护等级,防波堤按允许越浪标准;考虑施工期跨越台风期,为保证施工安全,码头与防波堤采用分离式布置,防波堤采用从陆域推填方式。码头采用高桩结构,长272.1 m、宽30 m,码头顶高程为4.8 m。平面布置见图1。

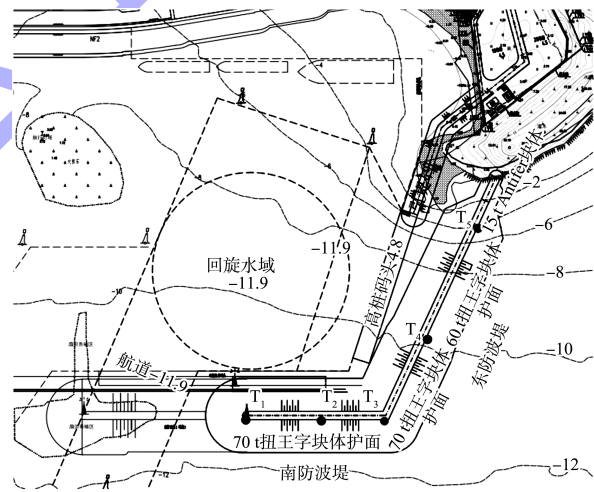


图1 平面布置(单位:m)

2 设计条件

2.1 设计水位

设计高水位为1.27 m,设计低水位为-0.17 m,极端高水位为2.50 m(50 a一遇高潮位),极端低水位为-0.81 m(50 a一遇低潮位)。

2.2 防波堤设计波要素

防波堤极端高水位50 a一遇及设计高水位下2 a一遇设计波要素见表1。

表 1 设计波要素

工况	位置	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_{13\%}/m$	周期 T/s	波长 L_m/m	波向/ $(^\circ)$
极端高水位 50 a 一遇	南防波堤	9.92*	9.92*	8.79	12.00	132	142
	东防波堤	8.42*	8.42*	8.42*	12.00	123	146
设计高水位 2 a 一遇	南防波堤	5.36	4.64	3.75	8.40	83	168
	东防波堤	5.23	4.56	3.72	8.40	78	171

注: * 表示波浪已破碎。

3 堤顶高程确定

3.1 规范标准

根据规范第 4.2.2 条, 对允许越浪、顶部无胸墙的斜坡堤, 堤顶高程宜在设计高水位以上不小于 0.6 倍设计波高值处, 设计波高取 50 a 一遇 $H_{13\%}$ 。经计算, 堤顶高程按规范要求取 6.5 m。

3.2 堤顶高程优化思路

本防波堤仅为单个泊位提供掩护, 仅考虑提供泊稳条件和可作业时间, 设计标准可适当降低, 只需要考虑 2 a 一遇的波浪基本不越浪, 即堤顶高程在设计高水位+2 a 一遇 $H_{13\%}$ 处, 经计算, 堤顶高程按 2 a 一遇基本不越浪要求取 5.0 m。堤顶高程从规范要求 6.5 m 优化至 5.0 m, 基本不恶化港内泊稳条件和损失作业时间。堤顶高程降低一定程度上增加了越浪量和堤后次生波, 对防波

堤内侧结构稳定性和码头结构安全性产生不利影响。应确保在 50 a 一遇的极值波浪作用下, 堤体结构和码头结构稳定可靠, 同时满足施工工艺要求。

4 防波堤结构

根据以上优化思路初步确定堤顶高程范围为 5.0~6.5 m。为确定防波堤护面块石稳定质量, 建立三维整体物理模型^[9], 验证堤顶高程 6.5 m 方案下, 南堤和东堤最大扭王字块稳定质量为 70 t, 防波堤结构断面见图 2(南堤—东堤 150 m)。防波堤内外坡均采用 70 t 扭王字块护面, 其下采用 3.5~4.0 t 大块石和 200~300 kg 垫层, 坡度为 1:1.5。采用 1.0~1.5 t 块石嵌入河床护底, 东堤沿堤采用 70、60 和 15 t Anterfer 块体^[10]。

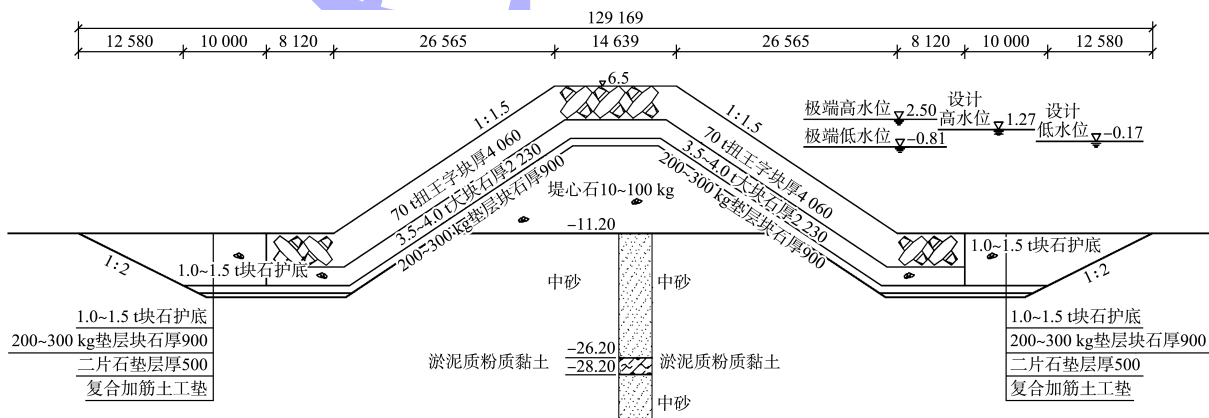


图 2 设计方案南堤—东堤 150 m 结构断面 (尺寸: mm; 高程: m)

5 防波堤断面物理模型试验

5.1 模型设置

为进一步对堤顶高程进行优化, 节省工程投资, 增加堤顶高程 5.0 m 方案的断面物理模型试验^[11], 验证两种方案的防波堤结构稳定性, 并测

量堤后次生波。

波浪断面试验在交通运输部天津水运工程科学研究院临港试验大厅中进行, 水槽长 68 m、宽 1 m、高 1 m。防波堤断面采用抛石斜坡堤结构, 进行堤顶高程 6.5 m 和 5.0 m 两个典型断面试验。

试验模拟几何比尺 39.5，即波高比尺为 39.5，周期比尺为 6.3。为测量堤后次生波，设置 3 个传感器，见图 3。试验前模型俯视图见图 4。进行各断

面稳定性试验时，每个水位条件下模拟原体波浪作用时间取 3 h。

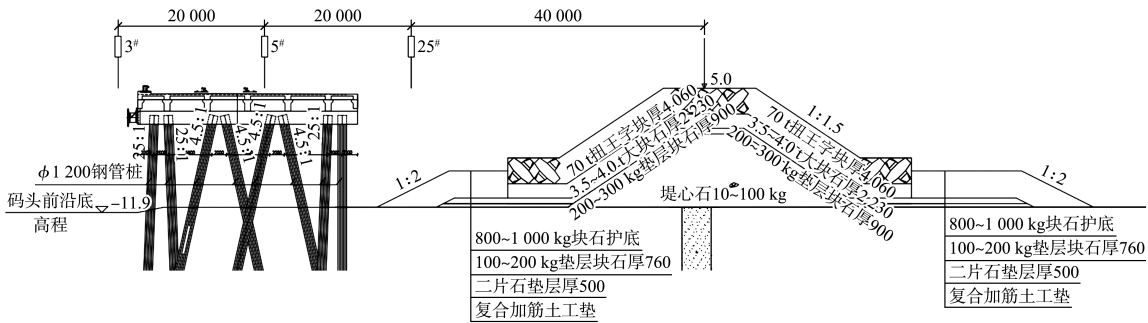


图 3 堤后传感器布置 (尺寸: mm; 高程: m)



图 4 试验前模型俯视图

5.2 试验结果

5.2.1 堤顶高程 6.5 m 方案

在设计高水位、设计低水位、极端高水位、极端低水位 50 a 一遇波浪连续作用下，防波堤结构整体稳定。越浪水体最大冲击范围距防波堤堤顶中心线约 40 m。堤顶高程 6.5 m 时极端高水位下 50 a 一遇的越浪情况见图 5。

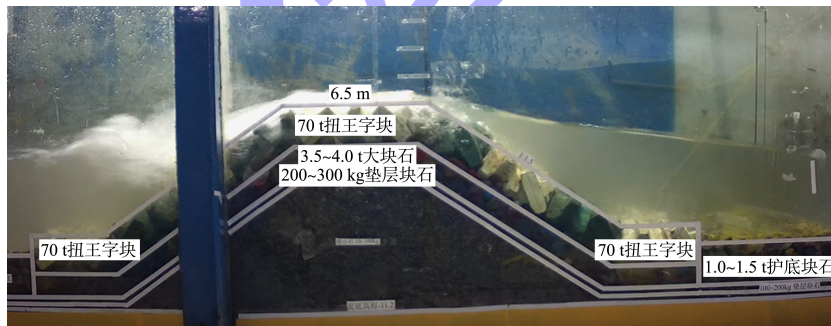


图 5 堤顶高程 6.5 m 时极端高水位下 50 a 一遇越浪情况

极端高水位 50 a 一遇波浪作用下，由越浪引起的堤后次生波传到码头前沿处 $H_{1\%} = 3.53$ m、 $H_{13\%} = 1.69$ m。

设计高水位 50 a 一遇波浪作用后，由越浪引起的堤后次生波传递至码头前沿 $H_{1\%} = 2.70$ m、 $H_{13\%} = 1.21$ m。设计高水位 2 a 一遇波浪作用下，以溅浪为主，堤后次生波传递至码头前沿位置时

$H_{1\%} = 0.12$ m、 $H_{13\%} = 0.06$ m。

5.2.2 堤顶高程 5.0 m 方案

在设计高水位、设计低水位、极端高水位、极端低水位 50 a 一遇波浪作用后，防波堤结构整体稳定。越浪水体最大冲击范围距防波堤堤顶中心线约 50 m。堤顶高程 5.0 m 时极端高水位下 50 a 一遇的越浪情况见图 6。

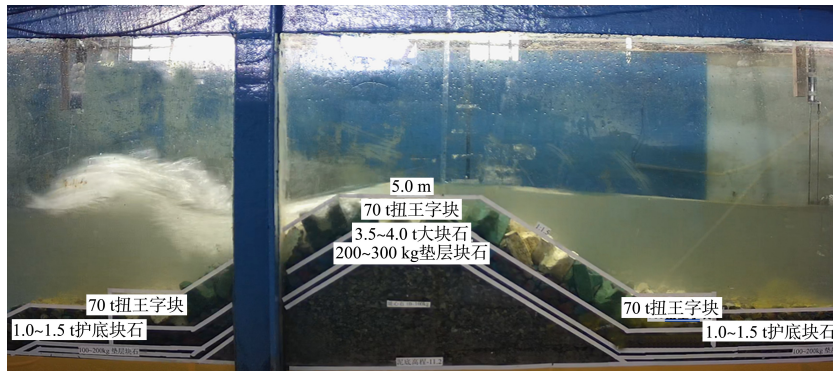


图 6 堤顶高程 5.0 m 时极端高水位下 50 a 一遇越浪情况

极端高水位 50 a 一遇波浪作用下, 由越浪引起的堤后次生波传到码头前沿处 $H_{1\%} = 4.85$ m、 $H_{13\%} = 3.25$ m。

设计高水位 50 a 一遇波浪作用后, 由越浪引起的堤后次生波传递至码头前沿 $H_{1\%} = 4.14$ m、 $H_{13\%} = 2.48$ m。设计高水位 2 a 一遇波浪作用下, 波列中有 13% 的波浪越过防波堤, 堤后次生波传递至码头前沿位置时 $H_{1\%} = 0.43$ m、 $H_{13\%} = 0.31$ m。

试验结果表明: 堤顶高程 5.0 m 方案防波堤结构整体稳定。由于波浪爬高的影响, 按设计高水位+2 a 一遇 $H_{13\%}$ 组合工况控制, 一定程度上增大了港内波高, 恶化了港内泊稳条件。须进一步复核绕射波高叠加次生波后, 是否满足泊稳波高要求。

6 码头结构受力验证

为验证堤顶高程 5.0 m 时, 码头结构受力是否满足要求, 需要计算极端高水位+50 a 一遇波浪组合工况下堤后次生波和绕射波叠加后的波高, 绕射波高采用波浪数学模型计算结果, 堤后次生波采用断面物理模型测量结果。根据合成波高计算码头面板所受浮托力和桩基所受波浪力。根据断面物理模型试验结果, 堤顶高程 6.5 和 5.0 m 时港内波高见表 2。

表 2 极端高水位+50 a 一遇 $H_{1\%}$ 合成波高

方案	堤后次生波高/m	绕射波高/m	合成波高/m
堤顶高程 6.5 m	3.53	5.00	6.06
堤顶高程 5.0 m	4.85	5.00	6.92

6.1 面板受力

根据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[12] 第 10.5.5 条, 计算高桩码头面板底部纵向单位长度上的波浪最大总浮托力。经计算, 堤顶 6.5 和 5.0 m 高程时波浪最大总浮托力分别为 47.82 和 53.87 kPa。可见, 堤顶高程 5.0 m 堤后次生波增大 1.3 m (36.8%), 对波浪最大总浮托力仅增大 6.05 kPa (12.7%)。因此, 降低堤顶高程, 导致堤后次生波加大对码头面板浮托力整体影响不大。

6.2 桩基受力

根据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》第 10.3 条, 计算桩基所受波浪力见表 3。可以看出, 降低堤顶高程导致次生波增大 1.3 m (增大 36%), 桩基波浪力也相应要增大大约 23%。

表 3 桩基波浪力

水面上 高度/m	桩基波浪力/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)		增大 百分比/%
	堤顶高程 6.5 m	堤顶高程 5.0 m	
15.1	13.72	17.02	24.05
14.4	13.72	16.96	23.62
9.6	11.84	14.55	22.89
4.8	10.82	13.23	22.27
0	10.49	12.82	22.21

6.3 结构模型验证

根据以上浮托力和桩基波浪力, 选取典型结构段建立梁板式高桩码头有限元模型进行仿真计算, 有限元模型见图 7。码头结构段长 68 m、宽 30 m, 共 9 个排架, 排架间距为 8 m, 桩基采用 $\phi 1\ 800$ mm 灌注桩。有限元模型考虑了船舶撞击力、船舶系缆力、码头自身重力、码头均布荷载、

波浪浮托力或冲击压强等荷载。模型结果表明：堤顶高程降至 5.0 m 后码头桩基及面板所受波浪荷载有所增加，但对码头结构影响较小，码头面板产生的弯矩和桩基的位移等变形均能满足使用要求。

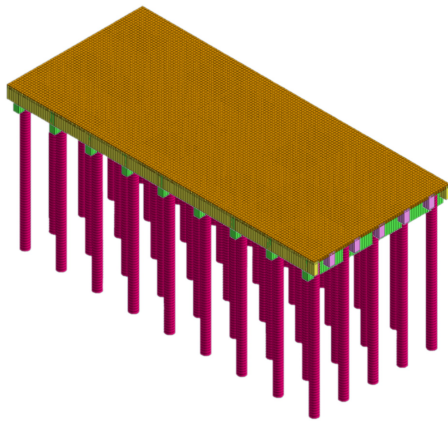


图7 梁板式高桩码头有限元模型

7 推荐方案

7.1 泊稳条件复核

根据以上试验成果和模型结果可以看出，堤顶高程优化至 5.0 m，防波堤结构和码头结构均能满足稳定性和受力要求。但由于设计高水位+2 a 一遇工况下港内波高增大，恶化了港内泊稳条件。需要进一步复核绕射波高叠加次生波后，是否满足泊稳波高要求。

根据本工程波浪数学模型研究报告^[13]，设计高水位 2 a 一遇 $H_{4\%}$ 最大为 1.21 m。叠加次生波后增大为 1.27 m。本工程设计船型为非常规货运船舶，泊稳标准为：1) 靠泊标准，设计高水位 2 a 一遇 $H_{4\%} \leq 1.0$ m；2) 装卸作业标准，设计高水位 2 a 一遇横浪 $H_{4\%} \leq 0.5$ m、顺浪 $H_{4\%} \leq 1.0$ m。

当堤顶高程为 6.5 m 时，按装卸作业允许波高 $H_{4\%} \leq 0.5$ m 控制时，因波浪作用引起的损失作业时间每年最多为 24 d，按靠泊标准允许波高 $H_{4\%} \leq 1.0$ m 控制时，因波浪作用引起的损失作业时间每年不超过 1 d。当堤顶高程为 5.0 m 时，按装卸作业标准允许波高 $H_{4\%} \leq 0.5$ m 控制时，基本不发生越浪，作业时间情况与 6.5 m 堤顶高程基本一致，按靠泊标准允许波高 $H_{4\%} \leq 1.0$ m 控制时，S 和 SSE 向浪(最不利两个浪向)防波堤外侧

设计高水位 2 a 一遇 $H_{4\%}$ 分别为 2.5 和 3.5 m，见图 8，叠加设计高水位 1.27 m 后为 4.77 m，低于 5.0 m 顶高程，基本不发生越浪，因此，按靠泊标准允许波高 $H_{4\%} \leq 1.0$ m 控制时，作业时间情况基本与堤顶高程 6.5 m 一致。

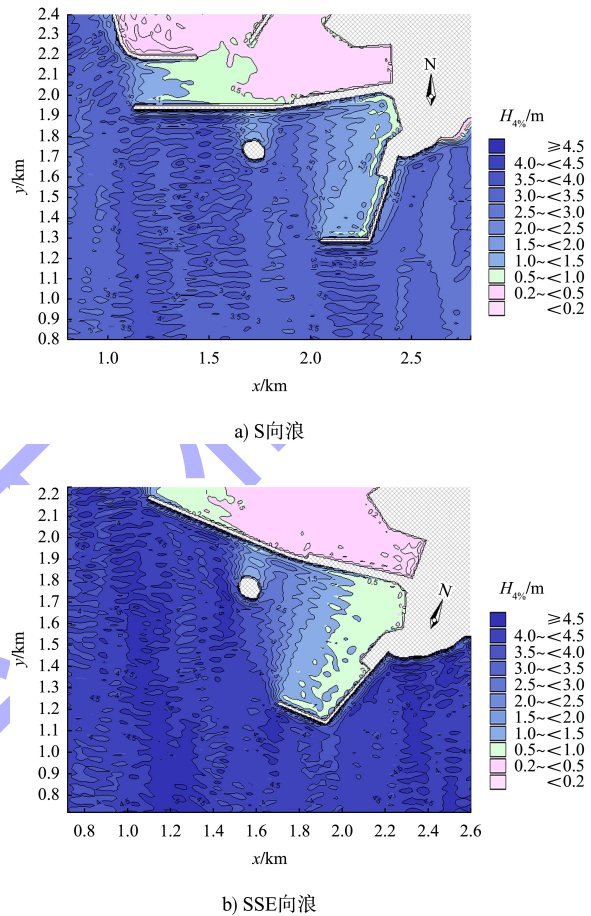


图8 设计高水位 2 a 一遇 $H_{4\%}$ 分布

可见，堤顶高程降低至 5.0 m，对港内泊位条件影响有限，基本不减少靠泊和作业时间。同时由于本工程属非货运码头，为应急抢险功能码头，对作业时间要求较货运码头低，因此该方案对泊稳条件变化程度在可接受范围。

7.2 施工工艺要求

防波堤施工可考虑水上船舶施工和陆上推填两种方式，水上船舶施工对海况要求高，海南岛东南海岸常年风浪较大，采用水上船舶施工，施工窗口期短，效率低，且施工风险较大。采用陆上推填方式，需要考虑施工期车辆行走安全。堤顶高程应采用施工水位+护面结构高度。施工水位

须在设计高水位(1.27 m)以上0.5 m。护面结构高度为4.06 m,得到堤顶高程5.8 m。

为保障施工安全,推荐采用陆上推填方式,因此堤顶高程取为5.8 m。

若按现行规范进行常规设计,堤顶高程为6.5 m,防波堤每延米造价为31.44万元;从实现防波堤功能的角度采用低矮型斜坡式防波堤设计方案后,堤顶高程可优化为5.8 m,防波堤每延米造价为30.97万元,共节省工程费331.52万元。

8 结语

1) 采用设计高水位2 a一遇 $H_{13\%}$ 标准控制的堤顶高程,因受波浪爬高影响在该工况下仍发生越浪,一定程度上引起港内波高增大。但对泊稳条件影响较小,基本不降低靠泊和装卸作业时间。

2) 降低堤顶高程虽引起堤后次生波加大,对码头面板浮托力影响较小,对码头桩基受力影响较大。

3) 对码头和防波堤采用分离式布置的工程,防波堤按允许越浪标准,防波堤顶高程可在规范常规设计的基础上适当优化,堤顶高程可按设计高水位2 a一遇波浪基本不越浪控制,但应满足防波堤稳定性和码头结构受力要求,同时尽可能不恶化港内泊稳条件,满足施工工艺要求。

参考文献:

[1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

- [2] 戈龙仔,管宁,陈汉宝,等. 带挡浪墙斜坡堤在满足越浪要求下的高程优化试验研究[J]. 水道港口, 2018, 39(3): 275-280.
- [3] 邓凌,邵帅,赵瑞东. 汉班托塔港公务码头防波堤顶高程的验证及优化[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(7): 161-162.
- [4] 李春潮,曾南海,刘东征. 科伦坡港口城外防波堤堤顶高程的确定[J]. 水运工程, 2015(9): 94-98.
- [5] 周惊慧,王崇贤. 汕头港广澳港区防波堤顶高程计算及模型验证[J]. 水运工程, 2012(7): 24-29.
- [6] 王军,李雪野,陈琦,等. 消浪肩台对斜坡式防波堤堤顶高程的影响[J]. 水运工程, 2020(9): 113-117.
- [7] 王君辉,姜宁林. 涌浪作用下岛式防波堤堤顶高程设计[J]. 水运工程, 2019(1): 84-88.
- [8] 杨云兰,司银云,王汝凯. 基于功能的深水岛式斜坡式防波堤方案设计[J]. 中国港湾建设, 2013(6): 18-21.
- [9] 中交水运规划设计院有限公司. 海南万宁抢险打捞综合基地工程可行性研究报告[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2023.
- [10] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 海南万宁抢险打捞综合基地项目波浪整体物理模型试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2022.
- [11] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 海南万宁抢险打捞综合基地项目波浪断面物理模型试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2022.
- [12] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [13] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 海南万宁抢险打捞综合基地项目波浪数学模型研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2022.

(本文编辑 王璁)

· 消 息 ·

5 000 kW 全回转拖轮完成试航

近日,四航局建造的5 000 kW全回转拖轮完成试航。该船全长32.86 m、型宽12.5 m、型深5.3 m,正拖拖力80 t、倒拖拖力72 t,是一艘集拖带、顶推、倒拖以及对外消防、溢油分散与回收等功能于一体的多功能拖轮。该船建成后,将被用于协助各类大型船舶进行靠离码头作业,并协助港口进行油污控制。

https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202408/t20240819_215695.html (2024-08-19)